

# Modelos numéricos para el estudio de incendios en túneles

**IGNACIO DEL REY**

Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM). Madrid

**EMILIO MIGOYA**

Mecánica fluidos - ETS Ingenieros Industriales, U.P.M.

**ALBERTO FRAILE**

Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM). Madrid

**ANTONIO CRESPO**

Mecánica fluidos - ETS Ingenieros Industriales, U.P.M.

**ENRIQUE ALARCÓN**

Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM). Madrid



La nueva red de carreteras es uno de los factores básicos de cohesión entre los países de la *Unión Europea*. Las estrictas condiciones impuestas en su proyecto para favorecer la rápida distribución de personas y bienes, tienen una gran influencia en la construcción de túneles mayores y mas largos que, además, sufren el paso de un numero de vehículos en continuo crecimiento.

Este aumento de trafico se ve acompañado por una demanda de confort y seguridad especialmente en lo que se refiere a la ventilación necesaria para mantener controlada la contaminación en el interior del túnel, así como en las precauciones que deben establecerse para limitar el daño y las muertes que puedan surgir durante el desarrollo de un incendio dentro del túnel.

En túneles urbanos donde la contaminación provocada por el trafico puede afectar el medio ambiente tradicionalmente se ha tomado como factor dimensionante la situación de servicio en condiciones de intensidad nominal. Sin embargo la reducción en la emisión de contaminantes como consecuencia de reglamentos mas estrictos ha inclinado la balanza hacia el escenario de fuego como el mas necesitado de estudio. En medio urbano esa situación se complica en caso de trafico saturado.

Puesto que esta condición *accidental* es independiente del trafico que cruza el túnel (salvo a efectos de las filosofías de actuación sobre los sistemas de ventilación) se concluye que esta situación es la condición dimensionante del sistema.

Existe una larga tradición en el estudio de estos temas que puede seguirse en la serie

de conferencias organizadas por la *BHRA* desde 1975 o las recomendaciones preparadas por el *grupo de túneles de la PIARC*.

También es interesante observar que las Administraciones de diferentes países están promoviendo la publicación de normas o Conferencias técnicas para controlar las condiciones de seguridad durante la vida de los túneles.

Una tendencia que puede observarse en el estudio de fuegos es el uso de *modelos físicos* (Foto 1), bien a escala natural (Hacar)<sup>(6 y 7)</sup> o reducida (Lacroix)<sup>(9)</sup> con objeto de comprender el comportamiento de los humos o de los artificios imaginados para controlarlos. Solo recientemente, con la disponibilidad de ordenadores mas potentes y métodos de calculo mas fiables se han comenzado a utilizar *modelos numéricos* para investigación (ver Figura 1) y no es difícil predecir que, en el futuro, se aplicarán de forma rutinaria al proyecto de nuevos túneles.

## MODELOS NUMÉRICOS

### 1. Modelos unidimensionales

Estos *modelos unidimensionales* mantienen un nivel de simplicidad que permite su uso para el análisis general del fenómeno así como una interpretación de éste en términos de variables macroscópicas controlables y utilizables incluso en términos de dimensionamiento. El bajo coste operacional de este modelo permite realizar multitud de estudios. Además sus resultados pueden ser utilizados para imponer condiciones de contorno en modelizaciones más complejas.

Este método supone que toda la sección transversal se encuentra en las mismas con-



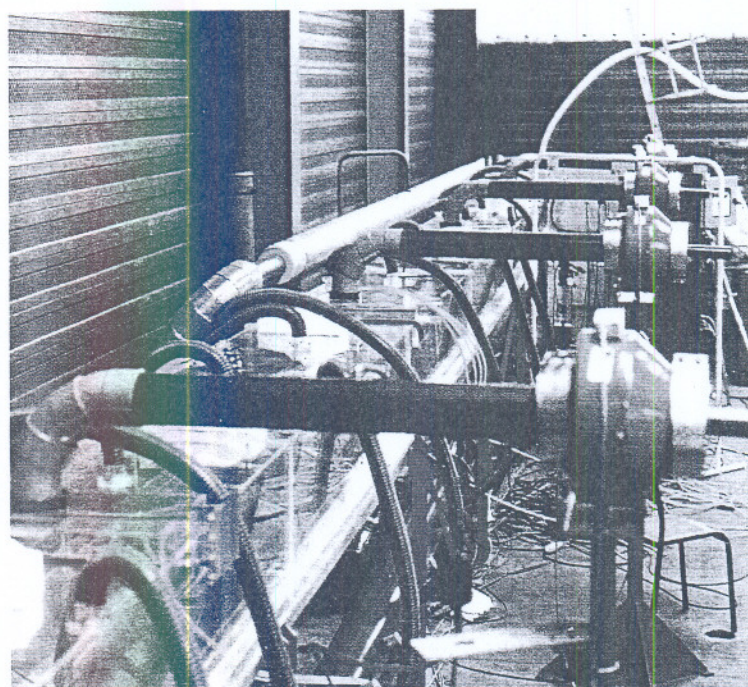
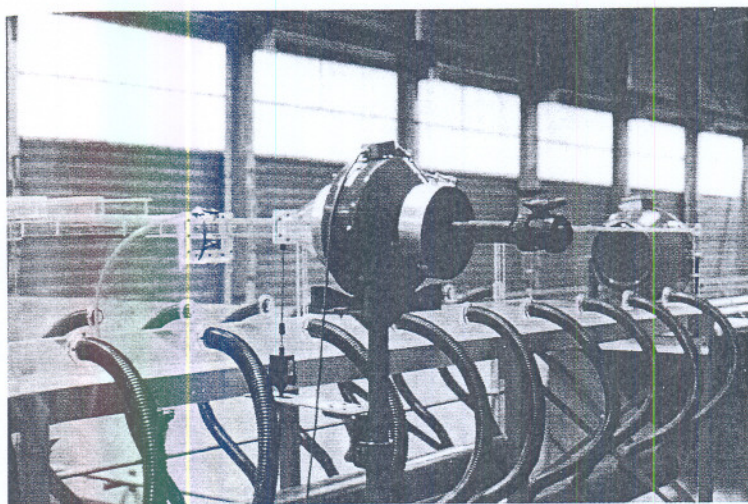


Foto 1. Ensayos con modelos físicos

diciones, lo que es claramente irreal en las proximidades del foco donde los gases calientes por flotación tienden a situarse bajo la bóveda o el falso techo del túnel, permitiendo una zona con aire respirable a la altura de las personas si se consigue mantener la estratificación. En este sentido cabe considerar que los resultados serán conservadores. Por otra parte, al perder los detalles en la sección transversal no se observan ciertos fenómenos como por ejemplo las

recirculaciones de la capa caliente. Una de las ventajas de este modelo es que permite acoplarlo fácilmente con el comportamiento del tráfico.

En el modelo se supone que los efectos de la compresibilidad del aire pueden despreciarse y se combinan las ecuaciones del movimiento para cada sección suponiendo la continuidad de la presión y el caudal. Así el movimiento de la columna de aire se describe mediante la ecuación de equilibrio:

$$M \frac{dW(t)}{dt} = F(t)$$

donde  $M$  es la masa de aire en el túnel  $W(t)$  su velocidad en cada instante de tiempo y  $F(t)$  la fuerza total en cada instante que incluye el efecto émbolo (variable con el tiempo según van parando los coches), el empuje de los ventiladores, las fuerzas meteorológicas y la resistencia del tubo (variable con la velocidad  $W$ ).

En el método de cálculo las ecuaciones de transferencia (velocidad, entalpía, concentración, etc) están condicionadas por los términos fuente y por las condiciones de contorno. En general se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}[\rho \vec{W}\phi + \vec{J}(\phi)] = q(\phi)$$

donde:

$\phi$  : propiedad genérica del fluido (magnitudes escalares transportadas)

$\rho$  : densidad

$\vec{W}$  : vector velocidad

$\vec{J}(\phi)$  : vector densidad de flujo

$q(\phi)$  : caudal de la fuente por unidad de volumen



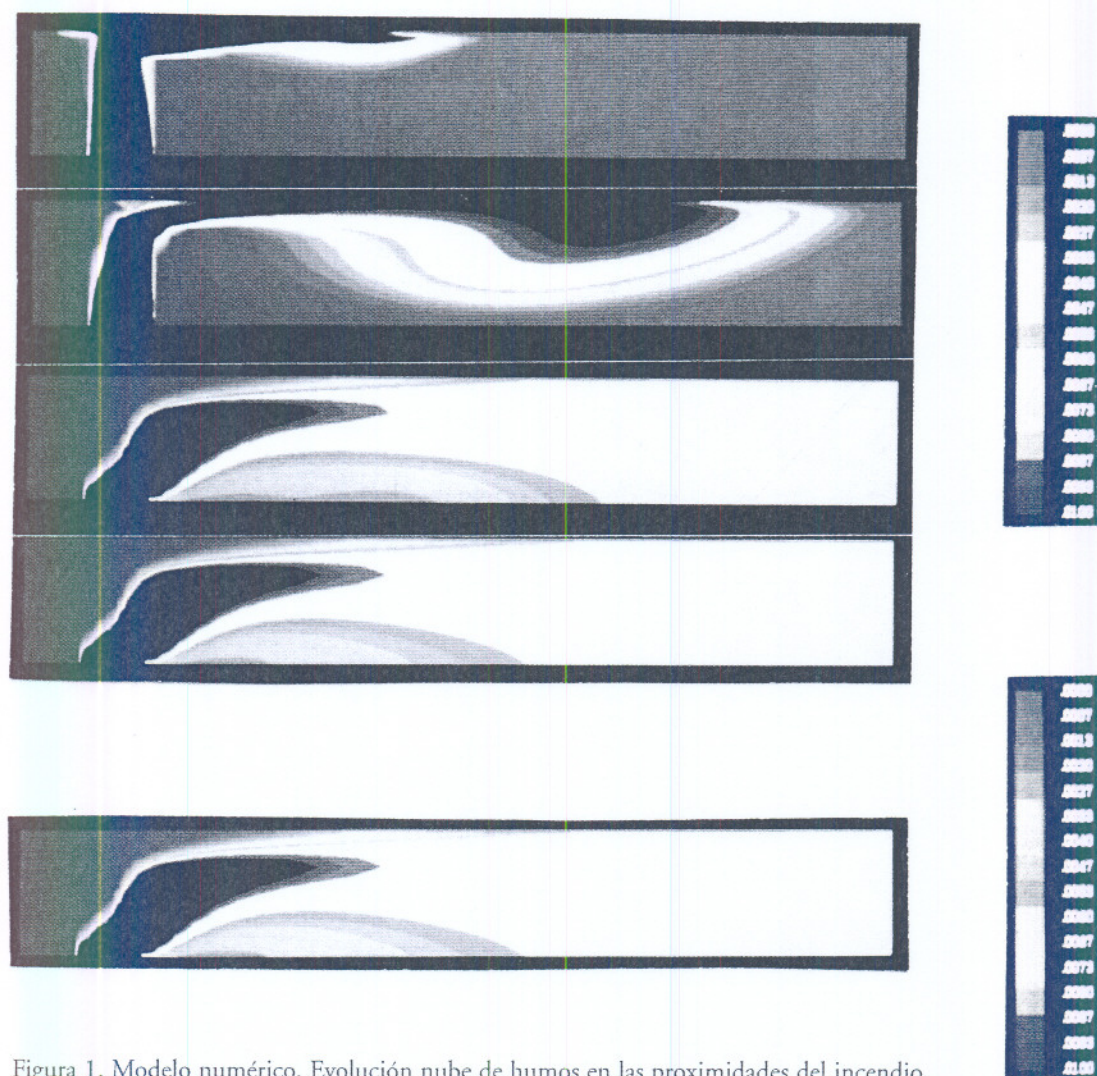


Figura 1. Modelo numérico. Evolución nube de humos en las proximidades del incendio

Para la resolución del sistema se recurre a un método de diferencias regresivas en el tiempo.

El modelo descrito contempla la propia evolución de contaminantes del incendio, el tipo de ventilación y las distintas actuaciones llevadas desde control.

Mediante este tipo de modelos es posible estudiar de una forma global el comportamiento de la nube de contaminantes en el interior del túnel. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se puede observar el tipo de resultados que se han obtenido mediante un modelo unidimensional. La figura

corresponde a un túnel de 900 metros de longitud donde se ha procedido a actuar mediante los aceleradores para conseguir la inversión de la nube de humos. En el eje de abscisas se representa la longitud del túnel, en el eje de ordenadas el tiempo transcurrido desde el incendio y las isolíneas corresponden a los valores del coeficiente de extinción (indicador de la opacidad) en el interior del túnel. Las líneas representan las trayectorias de escape de un usuario hasta las bocas del túnel.



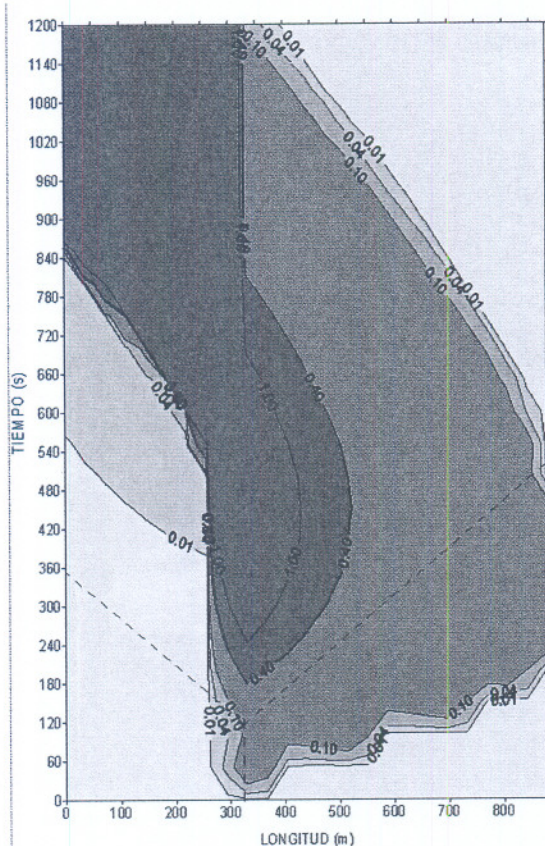


Figura 2. Movimiento de la nube de contaminantes en el interior del túnel

## 2. Modelos tridimensionales

El modelo unidimensional es apropiado para realizar estudios a nivel global donde se acepta que la temperatura, composición de los gases y otras magnitudes son lo sufi-

cientemente uniformes en secciones transversales al túnel. Obviamente esto no ocurre cerca de un incendio, donde ocurren fenómenos muy complejos y difíciles de modelar (ver Figura 3). Hay intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía, tanto por convección como radiación entre el aire, el objeto, los gases emitidos por éste y las paredes del túnel; las ecuaciones que rigen el fenómeno son las 5 ecuaciones de conservación de la *Mecánica de Fluidos*: masa, 3 de cantidad de movimiento y de la energía, además de las necesarias para modelar la combustión, la producción de hollín y la radiación (Figura 4).

Al ser las ecuaciones de conservación en derivadas parciales (siendo las variables independientes las coordenadas de cada punto y el tiempo), es necesario fijar, además de condiciones iniciales, condiciones de contorno apropiadas en la pared del túnel, en las paredes del objeto que arde (o alternativamente una simulación de cómo se consume el material combustible de dicho objeto o vehículo), y en la zona de entrada aguas arriba y de salida aguas abajo (Figuras 5 y 6). La resolución del anterior sistema de ecuaciones en derivadas parciales, junto con las condiciones iniciales y de

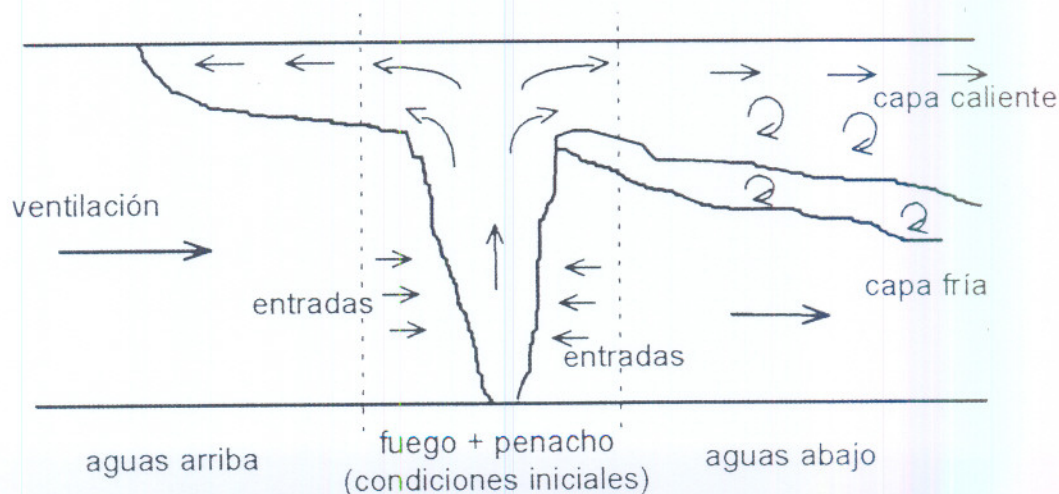


Figura 3. Esquema del comportamiento local del incendio



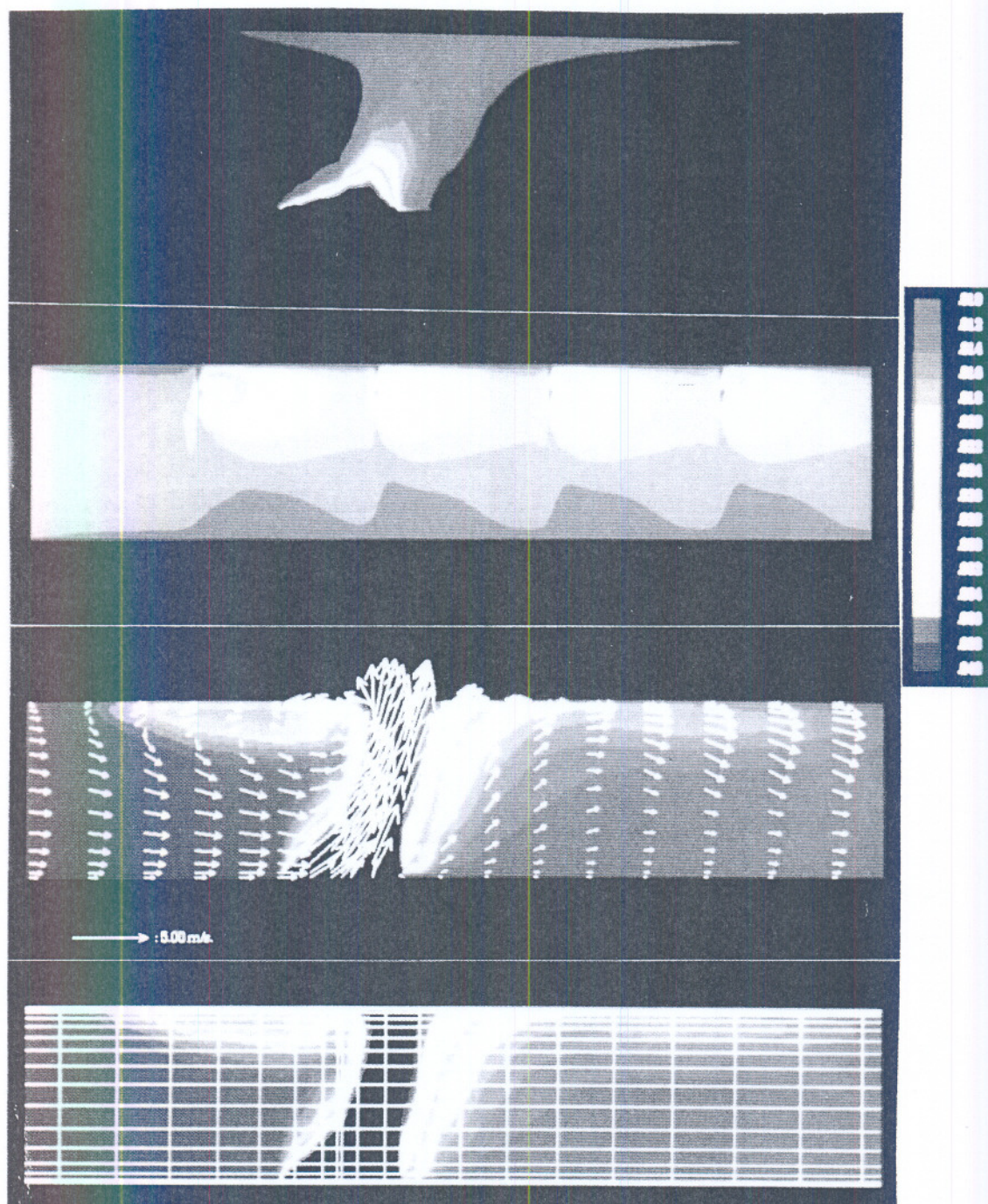


Figura 4. Modelo para simulación comportamiento local del incendio

contorno se realiza numéricamente, mediante discretización apropiada del campo de fluido y del intervalo temporal de interés.

Este tipo de *modelización tridimensional*, que trata de dar distribuciones de las distin-

tas magnitudes (temperatura, presión, velocidad, composición, etc) en todo instante y en todo el campo del incendio, es complejo y difícil de implementar con carácter general (Figuras 7 y 8), y requiere una capacidad de cálculo y tiempo de ordenador descomunal; por ello se tiende a desarrollar



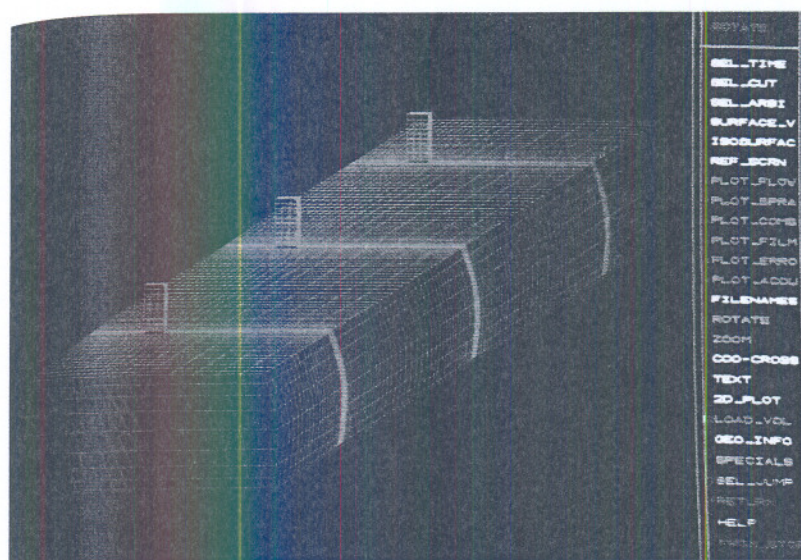


Figura 5. Modelo tridimensional. Sección transversal del túnel con trampillas de extracción

modelos más simples del denominado tipo compartimental o zonal, que ha sido aplicado a la simulación de fuegos en habitaciones o edificios, aunque muy escasamente en túneles.

### 3. Modelos zonales

Los *modelos zonales* en lugar de dar el detalle de lo que ocurre en cada punto, dividen el dominio en diferentes zonas o compartimentos, y dan propiedades medias de las magnitudes en cada una de ellas, o presuponen variaciones de acuerdo con reglas fijadas a priori, basadas en la experimentación o en argumentos físicos.

Cada uno de los elementos antes mencionados: objeto que arde, llama, penacho, capa caliente, paredes del túnel, capa fría inferior, zona de recirculación y regiones de entrada y salida, se supone que son las zonas o módulos en que se divide el fuego, la variación de cuyas propiedades está relacionada con los intercambios de masa, cantidad de movimiento y energía con las zonas circundantes.

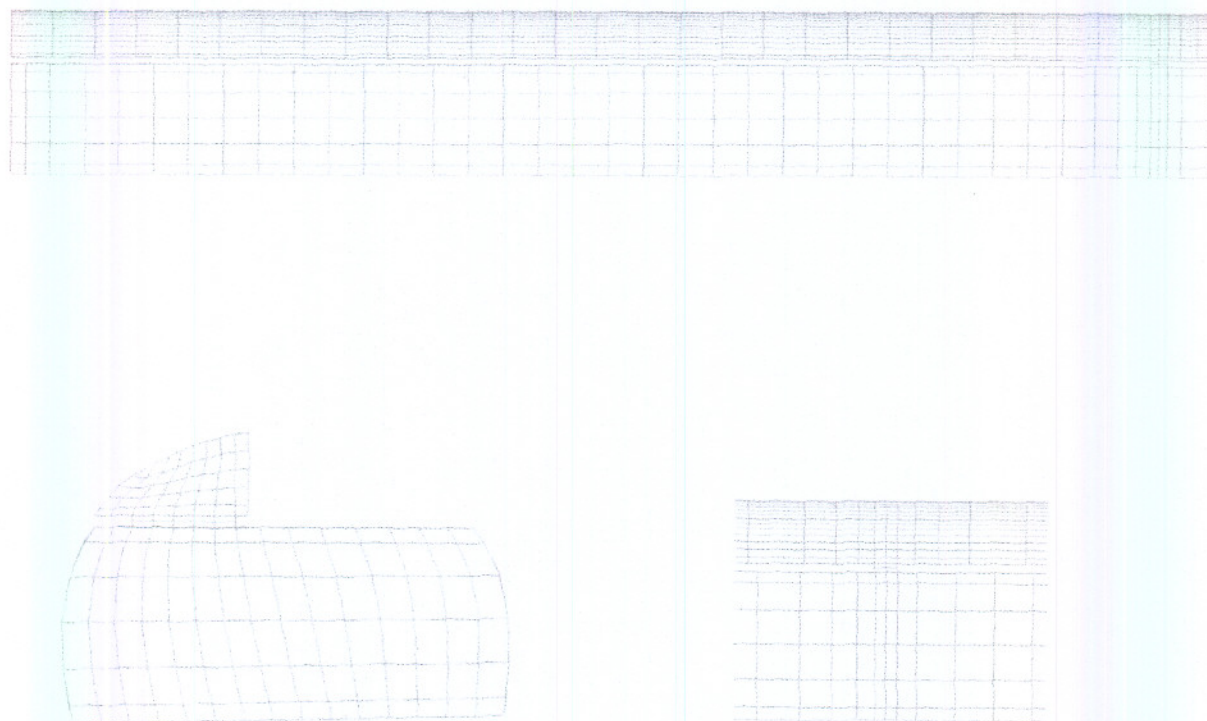


Figura 6. Malla para modelo tridimensional con ventilación semi-transversal (Túnel SOMPORT)



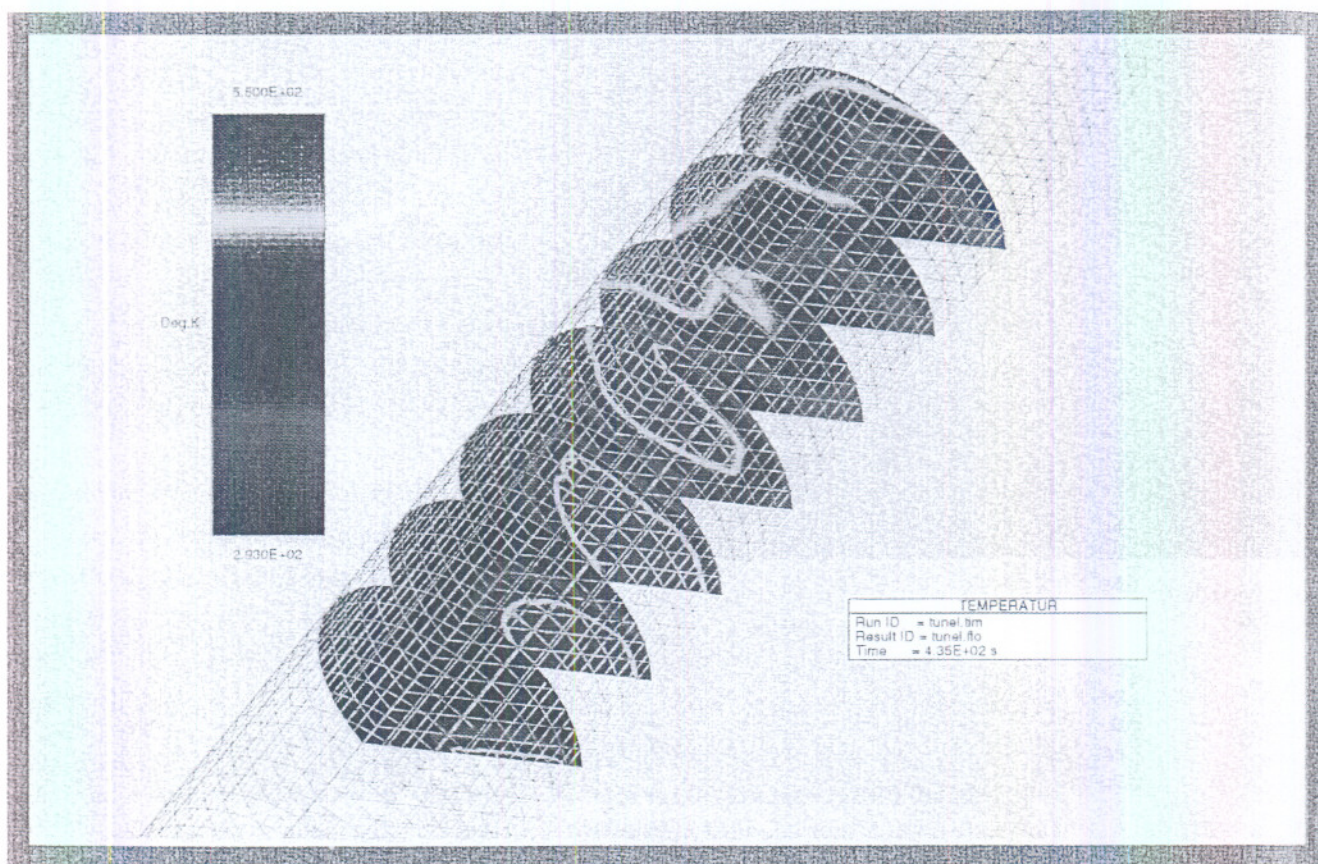


Figura 7. Ejemplo de resultados modelos tridimensionales para ventilación longitudinal (NEGRÓN II)

Este tipo de modelos es especialmente interesante para establecer relaciones con ensayos *in-situ* ya que aportan gran cantidad de información acerca de la evolución del incendio y se puede correlacionar bastante bien con los resultados de las medidas del ensayo con unos tiempos de cálculo considerablemente menores que para el modelo tridimensional.

En el caso del modelo empleado para el estudio de la ventilación de túneles de tipo longitudinal se ha dividido la zona a estudiar en dos. La primera, denominada *zona del penacho* incluye la llama en sí y llega hasta donde los gases calientes procedentes del foco del fuego impactan con el techo. La segunda, denominada *zona de difusión*, es el resto del túnel, aguas abajo del impacto con el techo. Realmente existe una terce-

ra, la *zona de transición*, intermedia entre las otras dos que es donde se realiza la conexión de las ya mencionadas.

Esto permite no tener que tratar todas las ecuaciones que rigen los modelos que tradicionalmente se emplean para la resolución de problemas como el planteado, como ocurre por ejemplo en el *k-ε turbulento* <sup>(8)</sup>. Es en la zona de impacto con el techo donde aún no se ha encontrado una forma realista de modelizar los fenómenos implicados.

El modelo de combustión está basado en la introducción de un escalar que se conserva, la fracción de mezcla. El incendio que se trata de simular consiste en una llama turbulenta de difusión que es descrita mediante distribuciones de valores medios de las



distintas magnitudes fluidas. Hay distintas hipótesis necesarias en el modelo.

- Se supone que la reacción de combustión es infinitamente rápida y se produce en una sola etapa de la forma:



donde  $r$  es la relación estequiométrica ( $\text{kgOx/Kgfuel}$ ), de esta forma el ritmo de

reacción química es mucho mayor que la difusión.

- Se considera la disipación viscosa despreciable, así como las fluctuaciones de la presión con el tiempo,  $\partial p / \partial t$ , en la ecuación de la energía. La temperatura y difusividad de las especies químicas se toman como iguales.
- El número de *Mach* será mucho menor

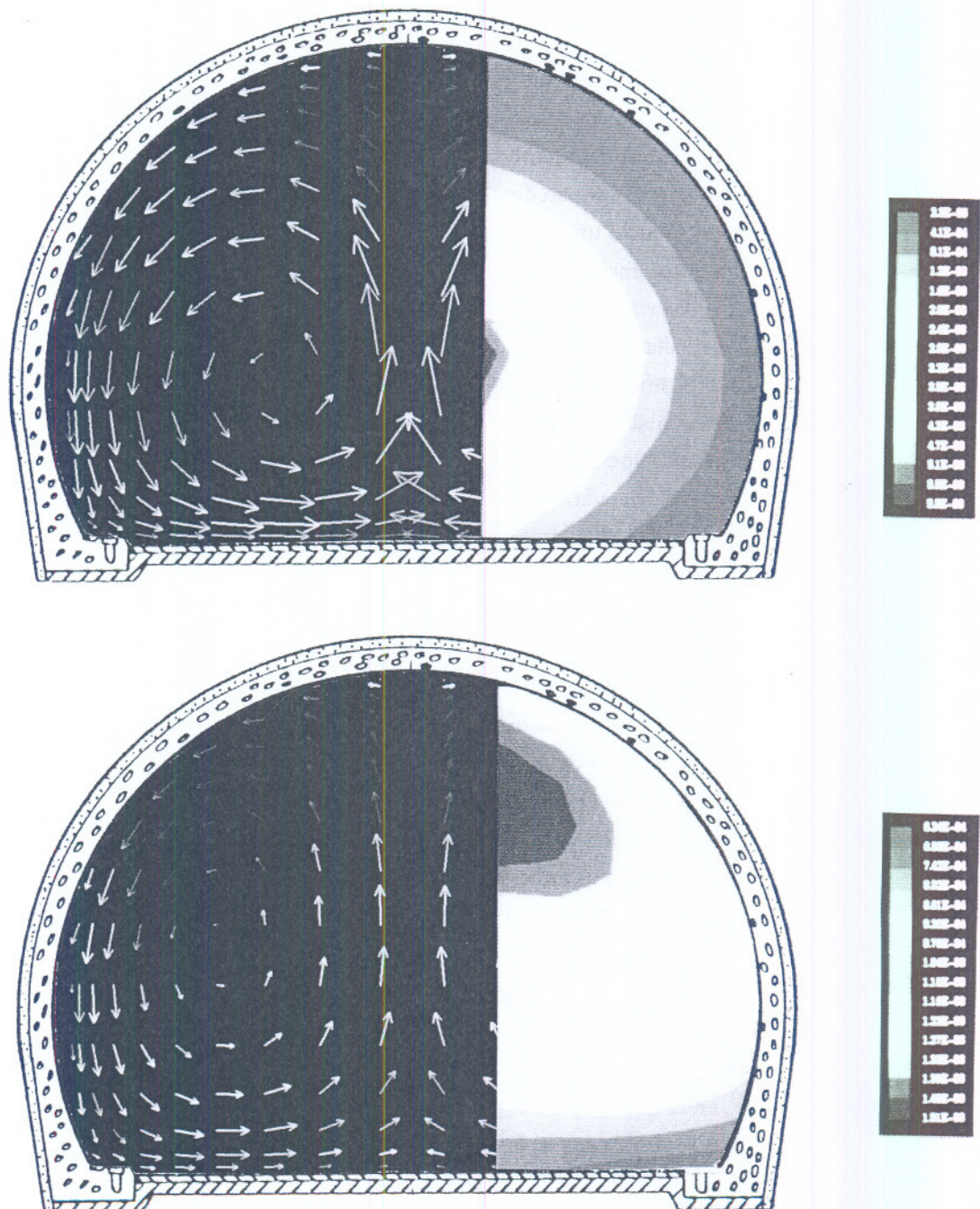


Figura 8. Ejemplo de resultados modelos tridimensionales para sección transversal



que uno mientras que el de *Lewis* ( $\rho D_{fp}/k$ ) será la unidad, es decir  $k/c_p = \rho D_f$ . De esta forma se consigue agrupar las ecuaciones de la energía y conservación de las especies química. Para ello basta con anular los términos de reacción química, mediante la adecuada combinación lineal de dichas ecuaciones y obtendremos una única en función de las variables de *Shvab-Zeldovich*.

Para la modelización del penacho se considera flujo permanente (incendio y ventilación en régimen) junto con movimiento libre al suponer que no afectan las paredes del túnel. Se trata de un modelo unidimensional con perfiles autosemejantes para las magnitudes fluidas en planos perpendiculares a la línea media del penacho. Los volúmenes de control son troncos de conos que siguen la línea media del penacho. Sobre cada una de sus superficies las magnitudes fluidas son consideradas uniformes. En las secciones perpendiculares a la línea media del penacho se supone que las magnitudes fluidas presentan una distribución gaussiana derivada del perfil "top-hat". En dicho perfil, las propiedades fluidas adquieren dos posibles valores uniformes según estén dentro o fuera del tronco de cono calculado en cada posición. Para hacer la transformación del perfil "top-hat" al gaussiano se emplearán coeficientes adimensionales calculados por *J. Servet* <sup>(24)</sup>.

Para calcular la masa de aire arrastrada desde el exterior del penacho se usa el modelo de *Escudier* <sup>(3)</sup>, en el que el arrastre está dominado por la turbulencia generada por el movimiento relativo chorro-flujo exterior.

El flujo de la segunda zona, la de difusión de gases calientes, se tomará como una corriente unidireccional (en el sentido de ventilación) que ha alcanzado la velocidad de régimen impuesta por los ventiladores. Si la temperatura de los gases fuese tan alta como para modificar de forma significativa la densidad, habría que recalcular la velocidad supuesta para que se satisficiera la ecuación de conservación de masa. De nuevo se resolverá la ecuación de la energía despreciando la disipación viscosa y la difusión en la dirección de avance del viento frente a la variación convectiva en dicha dirección.

La difusión presenta una forma parabólica con condiciones de contorno en techo, paredes, suelo y en la sección perpendicular a la dirección longitudinal del túnel situada en donde impacta el penacho con el techo. En esta última condición necesitaremos conocer cuanto vale el área inicial ocupada por los gases calientes. Para saberlo se aplica la condición de conservación de la energía con los datos obtenidos una vez resuelta la zona del penacho. De esta forma la primera sección de cálculo en esta zona se encuentra dividida en dos: una pegada al techo de área calculada y temperatura uniforme igual a la media de la última sección del penacho, y otra junto al suelo con el resto del área y temperatura igual a la ambiente.

En principio sólo es necesario estudiar un semitúnel ya que existe simetría respecto al eje longitudinal. En toda la zona de difusión se emplea un esquema de discretización con diferencias centradas. Este tipo de modelo también permite estudiar la estructura del frente térmico que avanza, reteniéndolo la difusión longitudinal en el sentido de la corriente de los gases.



En caso de estudiar la difusión en régimen estacionario se considera la corriente de aire como unidireccional paralela al eje longitudinal del túnel (dirección  $x$ ) y de velocidad  $U = U_x$ . El procedimiento consiste en resolver la ecuación de la energía despreciando la disipación viscosa ( $\phi_v = 0$ ) y la difusión en la dirección  $x$  frente a la variación convectiva en dicha dirección.

Por lo tanto queda:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \text{ gra } dt \right) = \phi_v + \text{div} k \nabla T + Q_r \rightarrow U \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_r$$

$$D_T = \frac{k_p}{\rho c_p} = \frac{0.1 U^* \rho R_{eq} c_p}{\rho c_p} = 0.1 U^* R_{eq}$$

$$\alpha = \frac{D_T}{U} = 0.1 \frac{U^*}{U} R_{eq} = 0.1 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} R_{eq} \quad (\lambda = 0.01365)$$

donde  $U$  y  $T$  son la velocidad y temperatura de los gases,  $D_T$  es el coeficiente de difusión térmica turbulento que se define a partir de  $k_p$  mediante la analogía con la transmisión de cantidad de movimiento que se indica arriba. El problema así planteado es parabólico con condiciones de contorno en el techo, la pared y el suelo. En primera aproximación se puede tomar como adiabático (flujo de calor nulo):

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$$

En primera aproximación, la sección de cálculo inicial adopta los valores de la última del penacho. Con esta hipótesis se produce una pérdida de energía menor del 5% debido al hecho de que, teóricamente, el perfil gaussiano de la distribución del penacho es infinito y por tanto penetraría dentro del contorno. Con la zona de transición entre el penacho y la difusión se mejora este aspecto.

Y si además se quiere estudiar la difusión en régimen no estacionario la ecuación a resolver como la del apartado anterior incluyendo el término transitorio:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = D_T \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

con condición inicial de  $T = T_a$  para  $t = 0$ .

En la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos mediante este modelo para simular el incendio de una potencia de unos 2 MW bajo una velocidad del aire en el interior del túnel elevada. En dicha figura se observa la evolución del penacho.



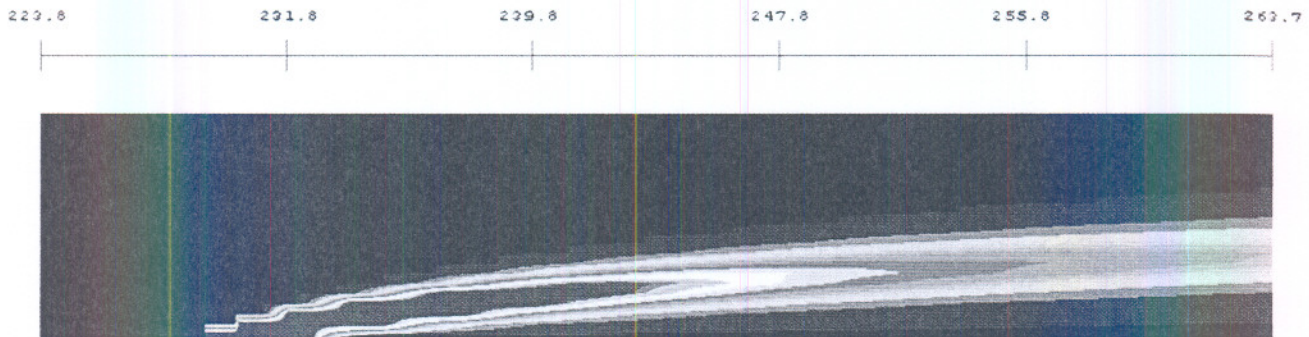


Figura 9. Distribución de temperaturas cerca del foco del incendio para alta velocidad del aire

Aunque el modelo zonal es mucho más sencillo que el tridimensional, el número de ecuaciones a resolver puede ser muy elevado, dependiendo del número de zonas y de magnitudes que describen cada una de ellas.

Otra complicación adicional es que existen regiones, como la pared del túnel, en las que el cálculo de la distribución de temperaturas requiere la resolución de una ecuación adicional, aunque ésta puede simplificarse tomando como única variable espacial la distancia a su superficie interna.

Mediante este tipo de modelos es posible reproducir el proceso de estratificación del humo en el interior del túnel (Figura 10). Gracias a ello se puede evaluar la existencia de una zona de seguridad situada debajo de las capas más densas de humo y que facilitarían el escape de los usuarios.

Además, como ya se dijo anteriormente una de las mayores utilidades de este tipo de modelos es la relación de los resultados obtenidos en ensayos *in-situ* con los parámetros que intervienen en el desarrollo del incendio. Uno de los ensayos más ambicio-

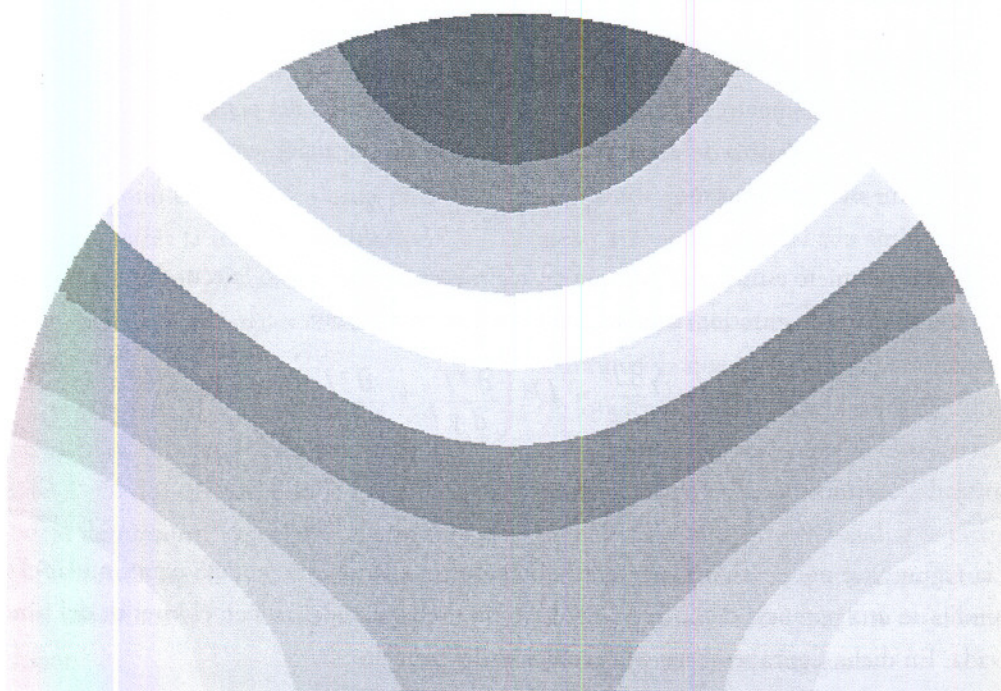


Figura 10. Distribución de temperaturas aguas abajo del foco del fuego.





Foto 2. Aspecto del Memorial Tunnel después de su acondicionamiento para el ensayo de instalaciones de ventilación

sos correspondieron a los realizados en el *Memorial Tunnel* (ver Foto 2).

Una de las principales dificultades de este tipo de modelos radica en los problemas que aparecen en la fase de transición cuando las velocidades del aire en el interior del túnel son pequeñas.

## CONCLUSIONES

Si se estudian los distintos métodos existentes actualmente para el estudio del comportamiento de los incendios en túneles no parece que se disponga de una solución única y definitiva. Tanto los *métodos numéricos* como los *modelos físicos* a escala o *in-situ* tienen sus limitaciones y ventajas. Por tanto, puede decirse que se trata de enfoques complementarios y que deben emplearse todos cuando la importancia de la obra así lo requiera.

El *modelo unidimensional* aparece como el de mayor simplicidad, las variables son introducidas de forma macroscópica permitiendo un análisis global del problema. Entre sus ventajas se cuentan el bajo coste operacional lo que posibilita el análisis de multitud de casos y el acoplamiento con la acción del tráfico. Esto lo convierte en una excelente herramienta para el estudio de *pautas de actuación* en caso de incendio

La realización de análisis locales requiere el uso de otros métodos de elevado coste como son los *modelos tridimensionales*. Estos últimos manejan un gran número de variables, se genera gran volumen de resultados y la interpretación de los casos resulta difícil, por lo que la elección de las hipótesis ha de ser especialmente cuidadosa. La principal limitación de estos modelos radica en la dificultad de definir el modelo, en particular pueden presentar problemas la fijación de condiciones de contorno o la simulación



del tráfico. Por otra parte la incertidumbre de los valores de las variables participantes pueden falsear los resultados. No obstante permiten conocer gran cantidad de información acerca del comportamiento e influencia de la zona próxima al foco en el desarrollo posterior del incendio.

Los *modelos zonales* se muestran especialmente interesantes para contrastar resultados obtenidos mediante ensayos *in-situ* y para estudiar de forma más precisa el comportamiento de la estratificación de la nube de humos. Este tipo de modelos ha sido habitualmente empleado para el estudio de incendios en lugares cerrados y en concreto para edificaciones. Es por esto que el CEMIM junto con el *Departamento de Fluidos de la ETSII de Madrid* está profundizando en esta línea de investigación para su aplicación en el campo de los túneles en el que, requiriendo un tratamiento similar, se presentan numerosas peculiaridades como la influencia del tráfico, las condiciones ambientales, el funcionamiento de los equipos de extracción de humos, etc.

Desde el punto de vista del proyecto cabe indicar la necesidad de que los cálculos no se limiten al dimensionamiento del sistema de ventilación sino que incluyan pautas de actuación sencillas que puedan ser seguidas de forma refleja por los responsables del *Centro de Control* en los primeros momentos del incendio ya que ello es clave en el éxito del proceso de evacuación. En este sentido es perentorio el desarrollo de *simuladores numéricos* que puedan ser utilizados en el entrenamiento y formación de los operadores del Centro de Control.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Alarcón, E. "Las trampillas para extracción de humos en el túnel de Somport". II Simposio de Túneles. Jaca 1998
- (2) Cox, G. (1995). "Combustion Fundamentals of Fire". Academic Press.
- (3) Escudier, M. P. (1972). "Aerodynamics of a Burning Turbulent Gas Jet in a Crossflow." *Combustion Science and Technology*, 4, 293-301.
- (4) Feske, J. D. y Tien, C. L. (1973). *Combustion Science and Technology*, 7, 25.
- (5) Gillard, J.R. *Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. Developments for the 21st Century*, bHr Group. Mech. Eng. Publication, 1997
- (6) Hacar, F.; García Arango, I. y otros. "Jornadas Técnicas sobre Túneles. La Seguridad en la Construcción y en Servicio". 1994. Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias.
- (7) Hacar, F.; Abella A.; García Arango I.: "Fuego en túneles". Ed. Paraíso, 1994. Oviedo. Spain
- (8) Hernández, J., Crespo, A. y Duijm, N. J. (1995). "Numerical Modeling of Turbulent Jet Diffusion Flames in the Atmospheric Surface Layer". *Combustion and Flame*, 101, 113-131.
- (9) Lacroix D. & Chasse P.: "Etude sur maquettes aerauliques des systemes de trappes de desenfumage en tunel routier". 1994. Centre d'etudes des tunnels. Lyon. France.



- <sup>(10)</sup> Launder, B. E. y Spalding, D. B. (1972). "Mathematical Models of Turbulence". Academic Press.
- <sup>(11)</sup> López Guarga, R. "Proyecto de instalaciones del túnel de Somport" MOPTMA 1996
- <sup>(12)</sup> López Guarga, R.; Mochón, L.; Martínez, A.; Alarcón, E. "Modelos numéricos para la simulación de incendios en túneles con ventilación semi-transversal y trampillas de extracción". II Simposio de Túneles. Jaca 1998
- <sup>(13)</sup> Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 1994. "Jornadas Técnicas sobre Túneles. La Seguridad en la Construcción y en servicio". MOPTMA. Spain
- <sup>(14)</sup> Ministry of Transport, Public Works and Water Management. 1994. "Recommendation on ventilation of road tunnels". KIVI. Holland
- <sup>(15)</sup> May. "Traffic Flow Fundamentals" Prentice Hall, 1990
- <sup>(16)</sup> Mochón, L. "Ventilación de túneles de carretera". Tesis doctoral. 1997
- <sup>(17)</sup> Mochón L.; Hernández J.; Crespo A.; Alarcón E.: "Algunos problemas en la ventilación de túneles de carretera"
- <sup>(18)</sup> Patterson, J. "Simplified Design for Building Fire Safety". J. Wiley, 1993
- <sup>(19)</sup> PIARC (Permanent International Association for road Congresses). Paris. FRANCE.
- <sup>(20)</sup> Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels. Borås. Swedish National Testing and Research Institute, 1994
- <sup>(21)</sup> Retana, P. "Regímenes transitorios de ventilación. Aplicación a la seguridad frente a incendios", Universidad Politécnica de Madrid, Tesis doctoral. 1999
- <sup>(22)</sup> Retana, P.; Del Rey, I.; Fraile, A.; Vivero, G.; Museros, P.; Alarcón, E. "Túneles urbanos con ventilación longitudinal y trampillas de extracción de humos". II Simposio de Túneles. Jaca 1998
- <sup>(23)</sup> Servet, J. (1993). "Modelado de llamas de difusión turbulenta y de su interacción con el medio ambiente y objetos circundantes". Universidad Politécnica de Madrid, Tesis doctoral.
- <sup>(24)</sup> Servet, J., Crespo, A. y Hernández, J. (1997). "A One-Dimensional Model of a Turbulent Jet Diffusion Flame in an Ambient Atmospheric Flow, Derived from a Three-Dimensional Model". Combustion Science and Technology, 124, 83-114.
- <sup>(25)</sup> Spalding, D. B. (1970). "Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames". XIII Symposium International on Combustion, Salt Lake City UT, 23-29 August (paper)
- <sup>(26)</sup> Swedish National Testing and Research Institute, 1994. "Proceedings of the International Conference of Fires in Tunnels". Borås. Communication limited. London. UK ●